沖積シラス地盤における杭の支持力に関する研究

BEARING CAPACITY OF PILES IN ALLUVIAL "SHIRASU" SOILS

安部 洋人*, 花園 祐二**, 徳 富 久 二***, 徳 広 育 夫***

*Hiroto ABE, Yuji HANAZONO, Hisashi TOKUTOMI
and Ikuo TOKUHIRO*

"SHIRASU" is a volcanic deposit and is distributed widely in South Kyushu. The natural deposits on plains of cities such as Kagoshima are transported by running water, therefore composed of the components of the "SHIRASU", and are called a alluvial "SHIRASU" soil. According to our experience, the piles in the alluvial "SHIRASU" soils show special characteristics in skin friction (shaft resistance). The skin friction of the piles was obtained from the results of the experiments of loading tests on the piles in the alluvial "SHIRASU" soil, and was compared with the results of the calculation by the architectural code for the foundation design.

The results show that the skin friction of the piles in the alluvial "SHIRASU" soils is greater than the calculated value by the architectural code. Further, it is shown that the skin friction can be estimated from the N-values of standard penetration test.

Keywords : Alluvial "SHIRASU" soil, Skin friction, Loading tests on the pile, Bearing capacity,
Standard penetration test, N-values
沖積シラス、周面摩擦力、杭の載荷試験、支持力、標準貫入試験、N値

1. はじめに

鹿児島、宮崎両県にまたがる南九州地域には、地質学的に火山性堆積物（火砕流堆積物の非熔結部）であるシラスに被われた丘陵地の洪積シラス地盤と、河川によって堆積されたシラスをその構成要素としている沖積シラス地盤がある。そのいずれもが特殊地盤として捉えられているが、建築物の基礎構造の設計施工においては特に沖積シラス地盤の特性が考慮されなければならないとされている。

丘陵地の洪積シラス地盤については現在まで多くの土質力学的な研究がなされてきたが、沖積シラス地盤については、系統的な調査研究がなされてきているとは云いがたい。そのため沖積シラス地盤に建設される建築物の基礎構造については不明な点が多く、早急に合理的な設計施工法の確立が求められている。

沖積シラス地盤に建設される建築物の基礎としては、1・2階建のものでは直接地耐力基礎、3・4階建以上の建物では杭基礎が多用されてきている。その杭基礎のほとんどが無騒音、無振動工法で施工された埋込み杭・場所打ちコンクリート杭であり、先端支持層が深いこともあって、その支持力のほとんどを地盤と杭周面との摩擦力に期待した摩擦卓越型の杭が採用されている。

これらの杭の挙動は、杭先端を硬質な地層（支持層）に定着させた通常の打込み杭のものとは明らかに異なることが今まで実施され

た杭の実大鉛直載荷試験結果により実証¹⁾²⁾されている。

また、建設省告示など⁴⁾⁵⁾で示されている杭の静力学的支持力算定式が埋込み杭や場所打ちコンクリート杭の場合、先端支持力と周面摩擦力の分担割合を十分に考慮していない（日本建築学会建築基礎構造設計指針（以下基礎指針）では、杭の許容支持力の決定にあたって、載荷試験実施により杭の支持力を確認することを推奨し、許容支持力時の沈下量に対応する杭先端と杭周面の抵抗力の寄与する割合を考慮することが、望ましいと提言している⁶⁾⁷⁾が、現状ではデータの不足のため地盤、施工法別の具体的な提案まではなされていない）ことや、支持力算定式の係数であるN値が地盤の力学的特性を直接的に反映していないことにより、地盤の種類や硬軟などによっては、実際の支持力と、支持力算定式により算定した支持力との間に大きな差異が生じることがあるといわれる。しかしながら杭の設計に用いられる支持力算定においては、バックデータが豊富であるとの理由から、N値を有効な値として用い、地盤を評価することが一般的であり、沖積シラス地盤においては摩擦が卓越する傾向から、安全側ではあるが、実際の支持力と支持力算定式の結果との間の差異は顕著なものとなる。

このことを、基礎構造設計の実際から考えると、特性が異なっても、建設省告示など⁴⁾⁵⁾の杭の静力学的支持力算定式による結果と

* 鹿児島大学大学院工学研究科建築学専攻博士後期課程
安部建築研究所 所長

** 鹿児島大学大学院工学研究科建築学専攻博士前期課程

*** 鹿児島大学工学部建築学科 教授・工博

Graduate School of Architecture, Kagoshima Univ.
The heads, Abe Architect & Engineers
Graduate School of Architecture, Kagoshima Univ.
Prof., Dept. of Architecture, Kagoshima Univ., Dr. Eng.

載荷試験による結果とがほぼ合えば一般に問題にはならないが、載荷試験の結果が大きく出る傾向を示すため、過剰設計となる。過剰設計によるコストが載荷試験のコストを上回ると思われるとき、杭の載荷試験が行われる。したがって、鹿児島市内に建設される建築物の規模が大きくなるに従い載荷試験が行われることが多くなる。

本研究は、このように多く存在する杭の載荷試験結果の資料を収集し、これらを解析することによって、沖積シラス地盤の杭の挙動を把握し、基礎構造設計の合理的な設計法に関する提案を行ったものである。

2. 研究目的

本研究は、沖積シラス地盤中の杭の鉛直支持力を、建設省告示など⁴⁹⁾の静力学的支持力算定式が合理的に評価しているものでないとの立場から、杭の鉛直載荷試験結果を出来るだけ多く収集して、そのデータを解析することにより、支持力と沈下量の関係を整理し、妥当な杭の静力学的支持力算定式を提案することを目的とする。

具体的に述べると、建設省告示など⁴⁹⁾で示されている杭の静力学的支持力算定式により算定された沖積シラス地盤での結果が種々の載荷試験の結果と比較して異なっていることが考えられる。このことは、沖積シラス地盤においては、杭周面最大摩擦力度とN値との関係($\tau=N/5$ または $\tau=N/3$)が異なっていること、また摩擦卓越型の杭の場合、先端支持力と周面摩擦力との分担割合が異なっていることに原因があるものと推定される。そのため、以下の手順で研究目的を達成することとする。

①杭の鉛直載荷試験結果を場所打ちコンクリート杭と埋込み杭とに分類整理する。

②それぞれの施工法別に分類された杭の鉛直載荷試験結果から最大杭周面摩擦力度とN値との関係を検討し、関係式を提案する。

③沖積シラス地盤での杭の支持力機構を調べるために、鉛直載荷試験結果から、荷重段階ごとの杭の先端支持力と周面摩擦力との分担割合を検討する。

④以上を行うことにより沖積シラス地盤でのそれぞれの施工法別の杭の静力学的支持力算定式を提案するものである。

3. 資料の整理、分類

本研究のために収集された鹿児島市及びその周辺の杭の鉛直載荷試験の資料数は100にも上る。これらの資料は、杭施工法、杭材種、杭形状、設計耐力、杭の諸元、標準貫入試験結果、載荷試験結果等を記録し、全てデータファイルとして保存する。

本研究で採用した資料は、これらのうち、洪積シラス地盤のものを除き、かつ杭周面摩擦力が計測された載荷試験のみの、表-1に示す20資料である。載荷試験の資料を整理する過程において、杭の種類を施工法別に①場所打ちコンクリート杭②排土型埋込み杭③非排土型埋込み杭(建設大臣認定工法)の3種類に分類することにした。ここで、排土型埋込み杭はセメントミルク工法で施工された杭であり、非排土型埋込み杭はセメントミルク工法に比べて排土量の少ない⁸⁾プレボーリング拡大根固め工法で施工された杭である。

表-1 載荷試験20例の試験杭の諸元および試験結果

試験 No.	工法	試 験 杭 諸 元					杭頭最大 荷 重	杭頭最大 沈 下 量	杭 先 端 最大荷重	杭先端最 大沈下量	備 考
		杭種・工法	杭径 (mm)	杭長 L(m)	L/D	実断面積 (cm ²)	(t) Pomax	(mm) Somax	(t) Ppmax	(mm) Spmax	
1	場 所 打 ち 杭	リバース	1200	62.9	52.4	11310	1600	121.0	228.0	101.3	FC GL-15.0m *
2		リバース	1800	55.0	30.6	25447	1800	168.1	772.2	158.2	FC GL-19.0m
3		リバース	1000	45.3	45.3	7854	750	11.2	39.3	2.6	
4		リバース	1200(1600)	45.6	38.0	11310	1500	56.7	402.8	41.5	FC GL-12.0m
5		アースドリル	1000	53.0	53.0	7854	1000	61.4	159.9	43.3	FC GL-6.25m
6		アースドリル	800	28.5	35.6	5027	360	5.7	17.1	2.9	
7		アースドリル	800	35.8	44.7	5027	450	6.1	18.6	0.2	
8		アースドリル	800	26.0	32.5	5027	360	7.6	24.5	4.8	
9		アースドリル	1000	51.0	51.0	7854	600	9.0	50.0	0.7	FC GL-15.0m
10		アースドリル	1000	32.8	32.8	7854	800	9.3	79.0	4.9	FC GL-1.3m
11		アースドリル	1000	33.4	33.4	7854	330	2.1	13.3	0.1	FC GL-1.0m
12		ベント	1000	34.5	34.5	7854	750	23.3	146.1	14.1	FC GL-7.9m
13		アースドリル	1200(1700)	33.6	28.0	11310	800	19.9	88.4	14.6	FC GL-4.9m
21	埋 込 み 杭	排 P C 杭	350	25.5	72.9	546	120	10.5	11.1	2.0	FC GL-18.5m
22		土 P H C 杭	600	45.0	75.0	1441	300	13.0	13.3	0.8	FC GL-20.0m
23		型 S T K 杭	600(700)	45.0	75.0	1441	500	28.1	94.7	11.4	
51		非 P H C 杭	450	28.0	62.2	835	450	25.2	18.7	7.3	
52		排 P H C 杭	600	25.0	41.7	1441	600	24.1	99.7	12.4	
53		土 P H C 杭	600	23.0	38.3	1441	600	14.6	59.0	4.5	FC GL-4.0m
54		型 P H C 杭	600	36.0	60.0	1441	600	15.3	105.3	1.5	

() 内は拡底杭径を示す。 * FCは摩擦カットを示す。

4. 沖積シラス地盤の最大摩擦力度

沖積シラスは土質分類としては砂質土として捉えられ、杭周面に働く摩擦力度を推定するための基本式は(1)式で表される。

$$\tau = \sigma \cdot \tan \phi \quad (1)$$

ここに

τ : 摩擦力度 (t/m^2)

σ : 杭に作用する水平方向有効応力で(2)式で求められる。 (t/m^2)

ϕ : 杭と土との間の摩擦角

$$\sigma = K \cdot z \cdot \gamma \quad (2)$$

K : 横方向土圧係数

z : 地表面からの深さ (m)

γ : 土の有効単位体積重量 (t/m^3)

以上の方法は、土質試験から求めた土の強度常数を用いたもので、 ϕ 、 K を求めることが困難であり、誤差ははかりやすく、実際にはあまり実用的ではない。これとは別に、主として実用的な面から摩擦力度(τ)を、N値などサウンディングの結果をもとに推定する提案も多い。基礎指針、建設省告示などはこれらの方法を採用している。

本研究においては、最終的には杭の実用的な支持力算定式の提案が目的であることから、杭周面最大摩擦力をN値との関係で整理することとする。

図-1.1、図-1.2、図-1.3に今回採用した載荷試験の中で、施工法別の代表的なものの土質柱状図と試験杭概要を示した。またその場所での載荷試験結果の摩擦力度と杭と地盤との間の相対変形量（沈下量）の関係を図-2.1、図-2.2、図-2.3に示す。

図-1.1 Na1 場所打ちコンクリート杭の土質柱状図と試験杭概要

図-1.2 Na22 排土型埋込み杭の土質柱状図と試験杭概要

図-1.3 Na52 非排土型埋込み杭の土質柱状図と試験杭概要

図-2.1 Na1 場所打ちコンクリート杭の摩擦力度と沈下量の関係

図-2.2 Na22 排土型埋込み杭の
摩擦力度と沈下量の関係

図-2.3 Na52 非排土型埋込み杭の
摩擦力度と沈下量の関係

図-2.1より、場所打ちコンクリート杭の周面摩擦力度は初期のうちは線形に近い非線形であるが、沈下量の増大とともに上昇し、最大摩擦力度に達した後は一方的に沈下量だけが增大している。摩擦力が最大に達した時の杭頭部の沈下量は表-2より、杭径の1.65%から3.40%の範囲にあり、一般に云われている杭径の3%程度の沈下で周面摩擦力は杭先端抵抗力よりも早く降伏値に達する⁹⁾ことと符合している。埋込み杭は、表-2より、排土型で杭頭最大荷重時の杭頭沈下量は杭径の2.17%から4.68%、非排土型で2.43%から5.60%である。しかしながら図-2.2より、排土型杭の周面摩擦力度は、相対沈下量が少ないためか、最大には達していない。図-2.3の非排土型杭の周面摩擦力度は、相対沈下量が杭径の2~3%であるが、最大には達していない。

また、図-3.1に場所打ちコンクリート杭の軸力分布を示す。この図を図-2.1と併せてみると杭周面の摩擦力が最大に達した後、初めて杭先端部が荷重を負担し始めていることがわかる。

図-3.2は排土型の埋込み杭、図-3.3は非排土型の埋込み杭の軸力分布を示すが、非排土型の埋込み杭は他の杭と比較して初期の段階から杭先端部に軸力が伝わっている。原因としては、図-2.3に示すように、他の杭に比べて杭周面摩擦力の初期剛性が小さいという特性が考えられるが、これは杭周面と地盤との間に、杭周面固定液の

使用量が排土型に比べて少ない貧調査の地盤改良部分が介在することによるものと考えられる。

表-2 最大周面摩擦力時の杭頭沈下量

No.	杭径 D(mm)	杭頭荷重 P(t)	杭頭沈下量 S(mm)	S/D %	備考
1	1200	1500	31.6	2.63	
2	1800	1080	34.7	1.93	
		1260	60.6	3.37	
3	1000	750	11.2	1.12	△
4	1200	1050	19.8	1.65	
5	1000	700	25.2	2.52	
		800	34.0	3.40	
6	800	360	5.7	0.71	△
7	800	450	6.1	0.76	△
8	800	360	7.6	0.95	△
9	1000	600	9.0	0.90	△
10	1000	800	9.3	0.93	△
11	1000	330	2.1	0.21	△
12	1000	750	23.3	2.33	△
13	1200	800	19.9	1.66	△
21	350	120	10.5	3.00	△
22	600	300	13.0	2.17	△
23	600	500	28.1	4.68	△
51	450	450	25.2	5.60	△
52	600	600	24.1	4.02	△
53	600	600	14.6	2.43	△
54	600	600	15.3	2.55	△

△印は摩擦応力度が最大に達していない場合を示す

図-3.1 Na1 場所打ちコンクリート杭の軸力分布図

図-3.2 Na22 排土型埋込み杭の軸力分布図

図-3.3 Na52 非排土型埋込み杭の軸力分布図

図-4に場所打ちコンクリート杭、図-5に排土型埋込み杭、図-6に非排土型埋込み杭、それぞれの載荷試験による最大摩擦力度とN値との関係を示す。整理に当たって、埋込み杭については、摩擦力度が載荷試験結果からはまだ増大傾向にあり最大値は読みとれず、摩擦力を過小評価するきらいはあるが、最大杭頭沈下量が、場所打ちコンクリート杭の最大周面摩擦力時の杭頭沈下量(杭径の約2.5%)と同程度以上であることから、データの最大値を最大摩擦力度として用いた。

図中に示した関係式(細線)は、各データから最小二乗法により求めたものであるが、この式の係数を整数で整理したものを施工法別に下記のように提案し、図中に太線で示す。破線は基礎指針で推奨されている $\tau = N/3$ の関係を示す。

場所打ちコンクリート杭の周面摩擦力度はN値の影響が小さく、ある一定の値を取るような傾向が伺える。

$$\tau = 5 + N/10 \text{ (t/m}^2\text{)} \quad (3)$$

排土型埋込み杭はデータ数が12個と少ないが、採用した摩擦力度がまだ増大傾向にあることを考慮して提案した。

$$\tau = 3 + N/4 \text{ (t/m}^2\text{)} \quad (4)$$

非排土型埋込み杭の摩擦力度は、載荷試験結果からはまだ増大傾向にあるにもかかわらず、他の杭に比べて非常に高い値を示している。これは、土とセメントミルクを混ぜ合わせソイルセメント状態にした掘削孔中に杭を回転埋設する施工法のため、杭周面と地盤との間に靱性の高い地盤改良部分が介在し、摩擦力が大きくなることに原因があるように思われる。非排土型埋込み杭の最大摩擦力度として、(5)式を提案する。

$$\tau = 3 + 2N/3 \text{ (t/m}^2\text{)} \quad (5)$$

5. 杭の静力学的支持力算定式

杭の支持力算定式について検討する場合の問題点として、杭の極限または設計基準支持力の定義の方法、及び先端支持力と周面摩擦力との分担割合の評価、の2点が挙げられる。本研究で対象としている場所打ちコンクリート杭や埋込み杭は、真の極限状態では、打込み杭と比較して非常に大きな沈下量が生じる。したがって、「基礎指針」においては、「真の極限鉛直支持力の代わりに杭径の10%の沈下量に達した時点での荷重を基準として考え、この値を基準支持力とする」と述べられている。土質工学会

図-4 場所打ちコンクリート杭の載荷試験による摩擦力度とN値の関係

図-5 排土型埋込み杭の載荷試験による摩擦力度とN値の関係

図-6 非排土型埋込み杭の載荷試験による摩擦力度とN値の関係

の「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」では、「第2限界荷重(極限荷重)は、杭先端直径の10%相当の杭先端又は杭頭沈下量が生じた時の荷重と杭頭の荷重-沈下量曲線が沈下量軸にほぼ平行とみなされる荷重のうち、小さい方とする」と定義されている。

本研究においては、極限荷重については上記の考え方を述べておくことに留め、主として、杭の先端支持力と周面摩擦力の分担割合について検討した。

杭の極限鉛直支持力は、杭先端支持力と杭周面摩擦力とから成り立っており、(6)式で表せる。

$$R_u = R_p + R_f \quad (6)$$

ここで

R_u : 杭の極限鉛直支持力 (t)

R_p : 杭先端極限支持力 (t)

R_f : 杭周面極限摩擦力 (t)

したがって、杭の許容鉛直支持力は、(6)式にある安全率を考えることにより、(7)式で表せる。

$$R_a = R_u / F - W \quad (7)$$

R_a : 杭の許容鉛直支持力 (t)

F : 安全率(長期の場合 $F=3$ 、短期の場合 $F=3/2$)

W : 杭の自重から排水重量を控除した値 (t)

杭の許容鉛直支持力は、(7)式で示される値以下であると共に、杭の許容鉛直支持力に相当する荷重が作用した状態における、杭先端支持力と杭周面摩擦力の割合を反映する必要があるため、下式が成り立つことになる。

$$R_a = 1/3 (\alpha_a \cdot R_p + \beta_a \cdot R_f) - W \quad (8)$$

$$R_s = 2/3 (\alpha_s \cdot R_p + \beta_s \cdot R_f) - W \quad (9)$$

ここで

R_a : 杭の長期許容支持力 (t)

R_s : 杭の短期許容支持力 (t)

α_a : 長期許容支持力時点での杭先端支持力の寄与係数

β_a : 長期許容支持力時点での杭周面摩擦力の寄与係数

α_s : 短期許容支持力時点での杭先端支持力の寄与係数

β_s : 短期許容支持力時点での杭周面摩擦力の寄与係数

本研究では建設省告示など⁴⁾⁵⁾の杭の静力学的支持力算定式を基本として、長期許容支持力、短期許容支持力それぞれの時点での、杭の先端支持力と周面摩擦力の分担割合を載荷試験の結果より求めることで、沖積シラス地盤中の杭の支持力算定式を提案する。ここで、先端極限支持力は、先端部への荷重の伝達が小さいので、本研究の載荷試験結果より判定することが出来ず、建設省告示など⁴⁾⁵⁾の支持力算定式で用いられているものを採用する。最大周面摩擦力度は、「4. 沖積シラス地盤の最大摩擦力」で提案した N 値との関係式、(3)、(4)、(5)式を使用することとする。載荷試験結果から、極限支持力を読み取り、その1/3を長期許容支持力、2/3を短期許容支持力とした。極限荷重(極限支持力)まで載荷されていないものについては、降伏荷重の2割増しの値を極限荷重と仮定して³⁾求めた。降伏荷重も記録されていない資料については、数学モデルを応用した極限荷重の判定法の「宇都らの方法」¹⁰⁾及び杭先端部に圧縮バネを、杭周面にせん断バネを設定した「杭-地盤バネモデル」¹¹⁾の解析から推定した。

(1) 場所打ちコンクリート杭

寄与係数 α 、 β を導入した長期及び短期の許容支持力算定式を(10)式、(11)式のように仮定する。

$$R_a = 1/3 \{ \alpha_a \cdot 15 \bar{N} A_p + \beta_a (5 + N/10) \psi L_f \} - W \quad (10)$$

$$R_s = 2/3 \{ \alpha_s \cdot 15 \bar{N} A_p + \beta_s (5 + N/10) \psi L_f \} - W \quad (11)$$

ここに

$\bar{N}$: 杭先端より下に1D、上に1Dの範囲の N 値の平均値

D : 杭径 (m)

N : 沖積シラス層の N 値の平均値

A_p : 杭先端面積 (㎡)

ψ : 杭周長 (m)

L_f : 沖積シラス層にある杭長 (m)

ここで、 R_a 、 R_s には載荷試験結果等から前述の方法で推定した値を、 $\bar{N}$ 、 N 、 A_p 、 ψ 、 L_f には載荷試験条件に応じた値を、それぞれ代入する。また一方では、長期及び短期許容支持力時点での杭先端支持力と杭周面摩擦力とを載荷試験結果から求める。その分担割合を用いて、(10)式、(11)式から寄与係数 α 、 β を求め、その平均値を場所打ちコンクリート杭の α_a 、 β_a 、 α_s 、 β_s とした。

(2) 埋込み杭

埋込み杭は、本研究で収集した資料数が、排土型で3例、非排土型で4例と少ないが、場所打ちコンクリート杭の場合と同様の方法で、排土型埋込み杭では(12)式、(13)式を、非排土型埋込み杭では(14)式、(15)式を用いて、それぞれの寄与係数を算出した。

$$R_a = 1/3 \{ \alpha_a \cdot 20 \bar{N} A_p + \beta_a (3 + N/4) \psi L_f \} - W \quad (12)$$

$$R_s = 2/3 \{ \alpha_s \cdot 20 \bar{N} A_p + \beta_s (3 + N/4) \psi L_f \} - W \quad (13)$$

$$R_a = 1/3 \{ \alpha_a \cdot 25 \bar{N} A_p + \beta_a (3 + 2N/3) \psi L_f \} - W \quad (14)$$

$$R_s = 2/3 \{ \alpha_s \cdot 25 \bar{N} A_p + \beta_s (3 + 2N/3) \psi L_f \} - W \quad (15)$$

表-3に杭の施工法別の、長期許容支持力、短期許容支持力における寄与係数と標準偏差を示す。杭の施工法を問わず、周面摩擦力の寄与係数は先端支持力のものより大きい、非排土型埋込み杭だけはその差が小さい。算出した寄与係数の信頼性については、標準偏差より判断すると、場所打ちコンクリート杭はデータ数が多いこともあり、最も高く、非排土型埋込み杭が最も低いと思われる。排土型埋込み杭はその中間である。

表-3 寄与係数一覧

杭種・工法	長期許容支持力		短期許容支持力	
	α_a	β_a	α_s	β_s
場所打ちコンクリート杭	0.13	1.35	0.22	1.28
標準偏差	0.10	0.18	0.12	0.20
排土型埋込み杭	0.15	1.49	0.22	1.47
標準偏差	0.11	0.33	0.02	0.36
非排土型埋込み杭	1.09	1.44	0.98	1.47
標準偏差	0.87	0.39	0.67	0.47

表-3のように求めた値から静力学的支持力算定式を整理し、0.05単位に丸めて、以下の式を提案する。

場所打ちコンクリート杭

$$R_a = 0.05 \times 15 \bar{N} A_p + 0.45 \times (5 + N/10) \psi L_f - W \quad (16)$$

$$R_s = 0.15 \times 15 \bar{N} A_p + 0.85 \times (5 + N/10) \psi L_f - W \quad (17)$$

排土型の埋込み杭

$$R_a = 0.05 \times 20 \bar{N} A_p + 0.50 \times (3 + N/4) \psi L_f - W \quad (18)$$

$$R_s = 0.15 \times 20 \bar{N} A_p + 0.95 \times (3 + N/4) \psi L_f - W \quad (19)$$

非排土型の埋込み杭

$$R_a = 0.35 \times 25 \bar{N} A_p + 0.45 \times (3 + 2N/3) \psi L_f - W \quad (20)$$

$$R_s = 0.65 \times 25 \bar{N} A_p + 0.95 \times (3 + 2N/3) \psi L_f - W \quad (21)$$

以上の提案支持力算定式は、建設省告示など⁴⁾⁵⁾の支持力算定式に比べて、支持力全体に占める周面摩擦力の割合が大きく、先端支持力が小さいことがわかる。特に、場所打ちコンクリート杭および排

土型埋込み杭においては、その支持力のほとんどを周面摩擦力で負担しているような式となっている。

沖積シラス地盤の特性として、シラス地盤では静的コーン貫入値 q_c と N 値との対比から測定 N 値を 2 倍に評価しうることや、二次シラス地盤のせん断波速度は測定 N 値を 2 倍に評価して推定したものと符合するなどの報告¹²⁾があるように、シラス地盤の場合、 N 値が小さめに測定されていると云われている。このことから、沖積シラス地盤に施工された杭は、通常の砂質地盤に施工された杭に比べて、より摩擦卓越型の特性を持っていることが推察される。

八尾らにより提案された場所打ちコンクリート杭の静力学的支持力算定式⁶⁷⁾を、砂質地盤のみを対象にして変形し、(22)式に示す。

$$Ra = 0.10 \times 15 \sqrt{N} A_p + 0.45 \times N / 3 \cdot \psi L_f - W \quad (22)$$

場所打ちコンクリート杭の提案支持力算定式を(22)式と比較すると、 N 値が 20 程度以下では、支持力全体に占める周面摩擦力の分担割合がより大きく、反対に先端支持力の分担は小さい。

八尾らの式を平均的な地盤での支持力算定式であると考え、沖積シラス地盤に設置された場所打ちコンクリート杭の支持力特性は、通常の砂質地盤に設置された杭に比べてより摩擦卓越型であることがわかる。

埋込み杭の提案支持力算定式については、載荷試験の摩擦力度がまだ増大傾向にあり最大値に達していないこと、本研究で収集した資料数が少ないこと、さらに資料のばらつきも大きいことなどの理

由で、場所打ちコンクリート杭に比べて信頼性がやや劣っていると思われるが、沖積シラス地盤における埋込み杭の摩擦卓越型という支持力特性を大筋としては反映しているものと考え、提案した。

提案許容支持力算定式を用いて算出した値と載荷試験から得られた許容支持力の値との比較を、既往の算定式から算出された値と併せて、表-4に示す。

①欄は載荷試験結果から得られた値、②欄には今回提案した支持力算定式から得られた値を示す。一方、③欄は建設省告示によるもので、最大摩擦応力度に $\tau = N/5$ を用いて算出した値、④欄は基礎指針で提案されている $\tau = N/3$ を用いて算出した値を示している。

③及び④欄では、杭先端支持力と周面摩擦力の寄与係数は考慮していない。備考欄の数値はPC杭及びPHC杭材の長期圧縮力を表したものである。

この表より、提案算定式から算出された杭周面摩擦力の値が先端支持力の値に比べて非常に大きく、提案支持力算定式が、沖積シラス地盤に施工された杭の支持力特性をよく表していることがわかる。載荷試験から得られた許容支持力と提案算定式から算出された値との比較においては、試験杭 20 例の内 13 例が差異 20% 以内にある。

埋込み杭のNa23、Na51、Na53およびNa54杭は、提案算定式から算出した値が杭材の許容圧縮力を上回っている、長期許容支持力は杭材から決定されることになる。

表-4 長期許容鉛直支持力比較

() 内は掘底杭径を示す。

No	工法	杭径 D(mm)	杭長 L(m)	杭 摩擦長 Lf(m)	先端部 N 値	中間 平均 N 値	杭自重 W(t)	① 推定	② 長期	先端 支持力 Rap(t)	周面 摩擦力 Raf(t)	既往の算定式による 長期許容支持力(t)		備考 (t)
								長期許容 支持力(t)	Ra(t)			告示式 ③	学会式 ④	
1	リバー	1200	62.9	47.0	17.6	9.1	98.2	530.0	388.0	14.9	471.2	108.9	180.5	
2	リバー	1800	55.0	35.2	21.6	14.1	193.1	500.0	422.3	41.2	574.1	268.9	393.6	
3	リバー	1000	45.3	45.0	28.5	18.0	49.5	350.0	399.9	16.8	432.6	232.1	345.2	
4	リバー	1200	45.6	33.0	58.6	27.2	71.2	500.0	449.3	88.4	432.0	743.4	893.8	
		(1600)												
5	アースドリル	1000	53.0	46.0	32.7	10.4	57.5	330.0	354.5	19.3	392.8	171.1	237.9	
6	アースドリル	800	28.5	28.0	15.0	9.6	19.7	220.0	174.7	5.7	188.7	63.0	93.1	
7	アースドリル	800	35.8	35.0	13.0	11.7	24.6	220.0	224.5	4.9	244.2	76.7	122.4	
8	アースドリル	800	26.0	26.0	18.3	12.1	18.3	140.0	171.2	6.9	182.6	80.4	115.6	
9	アースドリル	1000	51.0	35.0	40.0	13.8	55.0	290.0	284.3	23.6	315.7	203.3	270.7	
10	アースドリル	1000	32.8	31.5	43.3	20.5	36.1	310.0	303.4	25.5	313.9	269.2	359.4	
11	アースドリル	1000	33.4	32.4	24.3	12.9	36.7	280.0	265.7	14.3	288.1	146.2	204.6	
12	ベント	1000	34.5	26.6	50.0	17.0	37.9	320.0	243.5	29.5	251.9	253.1	316.3	
13	アースドリル	1200	33.6	27.7	11.0	9.3	51.6	290.0	245.8	18.7	278.7	138.0	181.1	
		(1700)												
21	PC杭	350	25.5	7.0	33.0	23.4	2.5	40.0	34.8	3.2	34.1	30.7	38.7	45
22	PHC杭	600	45.0	24.0	15.3	10.8	12.4	140.0	120.8	4.3	128.9	49.0	70.7	200
23	STK杭	600	45.0	45.0	20.0	11.3	12.7	170.0	242.0	7.7	247.0	102.5	145.1	200
		(700)												
51	PHC杭	450	28.0	28.0	20.0	12.6	4.5	200.0	226.4	27.8	203.1	55.3	77.5	130
52	PHC杭	600	25.0	25.0	11.0	7.1	7.1	283.0	184.1	27.2	164.0	41.2	56.0	200
53	PHC杭	600	23.0	18.7	17.0	13.8	6.4	273.0	229.1	42.1	193.5	66.1	87.7	200
54	PHC杭	600	36.0	35.0	17.0	12.1	9.9	260.0	360.7	42.1	328.5	83.4	118.9	200

6. まとめ

鹿児島・宮崎両県にまたがり分布している火山性堆積物シラスのうち、河川によって堆積されたシラスをその構成要素とした沖積シラス地盤における杭基礎の支持力機構を究明することが、今回の研究目的である。

沖積シラス地盤で実施された杭の鉛直載荷試験のうち、摩擦力が計測されたもの、20資料より、沖積シラス地盤における杭の最大周面摩擦力及び杭の先端支持力と周面摩擦力の分担割合を、施工法別に検討した。それに基づき、沖積シラス地盤における杭の静力学的支持力算定式の提案をおこなった。その結果、以下のようなことがわかった。

- (1) 沖積シラス地盤での杭の最大周面摩擦力度は、 N 値が20程度以下では $\tau = N/3$ より大きい。
- (2) 最大周面摩擦力度は、 N 値が4以上では非排土型埋込み杭が一番大きい。このことは、ソイルセメント状態の孔中に杭を回転埋設する施工法のため、杭周面と地盤との間に靱性の高い地盤改良部分が介在し、大きな摩擦力となることに原因があるように思われる。 N 値との関係は平均的に、場所打ちコンクリート杭は $\tau = 5 + N/10$ 、排土型杭は $\tau = 3 + N/4$ 、非排土型埋込み杭は $\tau = 3 + 2N/3$ で表せる。しかしながら埋込み杭で採用した摩擦力度は最大値には達していない。
- (3) 最大摩擦力に達した時の杭頭沈下量は、場所打ちコンクリート杭の場合は杭径の2～3%であるが、埋込み杭は4～5%の沈下量でも周面摩擦力は最大値に達していない。
- (4) 杭先端部への軸力の伝達については、場所打ちコンクリート杭は杭周面の摩擦力が最大に達するまで、ほとんど伝わっていない。非排土型埋込み杭はその他の杭と比較して初期の段階から杭先端部に軸力が伝わっているが、原因としては、杭周面摩擦力の初期剛性が小さいという特性が考えられる。
- (5) 提案支持力算定式は、建設省告示など⁴⁾⁵⁾の杭先端支持力と周面摩擦力の寄与係数を考慮していない支持力算定式に比べ、支持力全体に占める周面摩擦力の分担割合が大きく、先端支持力の割合が小さい。
- (6) 一般の地盤に対する八尾らの式との比較において、沖積シラス地盤における場所打ちコンクリート杭の支持力特性は、通常の砂質地盤に設置された杭に比べてより摩擦卓越型であるといえる。
- (7) 埋込み杭の提案支持力算定式は、場所打ちコンクリート杭のものに比べて信頼性が劣ると考えられるが、沖積シラス地盤にお

ける埋込み杭の摩擦卓越型という支持力特性を、大筋としては反映しているものと考えられる。

- (8) 沖積シラス地盤における埋込み杭の許容支持力は、周面摩擦力度が大きいために、杭摩擦長が長くなると、明確な先端支持層が無いにもかかわらず、杭材料強さで決定される場合がある。

謝辞

本研究は、鹿児島県、鹿児島市、及び杭基礎工事並びに杭載荷試験関係企業の方々から貴重な資料の提供を頂きました。ここに記して感謝申し上げます。また、本研究にあたり鹿児島大学工学部海洋土木工学科、北村良介教授には、多くの貴重なご助言を頂きました。ここに感謝申し上げます。

参考文献

- 1) BCP Committee: Field Tests on Piles in Sand, Soils and Foundation, Vol.11, No.2, pp.29～50, 1971.6
- 2) 高強度パイル研究会・施工分科会: 施工法別による支持力調査報告書、ポールパイル協会(1976)
- 3) 土質工学会: 杭の鉛直載荷試験方法・同解説、付録-3 各種杭の鉛直載荷試験結果に基づく支持力特性の調査検討、1993
- 4) 昭四六建告III: 地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力を求めるための地盤調査の方法並びにその結果に基づき地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力を定める方法
- 5) 東京都建築士事務所協会: 建築構造設計指針、東京都建築基礎設計取扱い(案)、pp.367～390、1985.5
- 6) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針、pp.217～220、pp.232～236、1988.1
- 7) 八尾真太郎: 場所打ち杭の支持力算定式について、日本建築学会大会学術講演梗概集、B構造I、pp.1277～1278、1986.8
- 8) コンクリートパイル建設技術協会: コンクリートパイル施工にともなう掘削土に関する調査報告書、pp.12～23、1994.3
- 9) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針、pp.223～225、1988.1
- 10) 宇都一馬、冬木衛、桜井学: 杭の載荷試験結果の整理方法、基礎工、Vol10、1982.9
- 11) 花園祐二、安部洋人、徳富久二、徳広育夫、竹田和彦: 沖積シラス地盤における摩擦杭の支持力に関する研究、日本建築学会大会学術梗概集、B構造I、pp.583～584、1997.9
- 12) 高田 誠、北村良介、北田貴光: 二次シラス地盤の力学特性の評価、土木学会論文集No.561、III-38、pp.237～244、1997.3

(1998年8月19日原稿受理、1999年2月26日採用決定)